

文章编号:1001-9081(2010)07-1722-03

# 无线传感器网络模型的形式化建模与分析方法

胡晓辉,姜 浩,曾雪娜

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

(happytest@126.com)

**摘要:**将形式化的分析工具 Petri 网应用在无线传感器网络的分簇和节点覆盖的研究中,可以对无线传感器网络进行形式化的描述和快速原型开发,建立相应形式化模型。由于 Petri 网具有坚实的数学理论,可以更好地研究无线传感器网络在分簇和节点覆盖过程中的能量约束问题,为更优的分簇结构和覆盖方法的设计提供理论基础和数值依据,并对已有的方法进行改进。

**关键词:**Petri 网;无线传感器网络;分簇;节点覆盖

**中图分类号:**TP319.9    **文献标志码:**A

## Formal modeling and analysis approach of wireless sensor network

HU Xiao-hui, JIANG Hao, ZENG Xue-na

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** Petri net, as a formal tool used in the research of clustering and node coverage of wireless sensor network, can help to describe the wireless sensor network formally and establish the corresponding formal model quickly. As the Petri net has solid mathematical theory, it can better research the energy constraint problem of wireless sensor network in the process of node clustering and covering. The formal model can provide the theoretical and numerical basis for the design of a better clustering and covering structure, and then help to promote the existing algorithm.

**Key words:** Petri net; Wireless Sensor Network (WSN); clustering; node coverage

## 0 引言

无线传感器网络是由大量能够进行感知、计算和无线通信的传感器节点通过自组织构成的网络,它能够根据环境自主地完成监测、目标发现、跟踪等任务<sup>[1]</sup>。其拓扑控制技术是目前主要的研究方向,包括层次型拓扑结构组织与节点功率控制,前者主要是针对网络进行分簇,后者主要是通过控制节点的发射功率来节约能耗。现在已有多种基于分簇处理的相关协议和算法,如 GAF<sup>[2]</sup>、LEACH<sup>[3]</sup>、TopDisc<sup>[4]</sup>等,但是它们都没能很好地解决节点覆盖和能量平衡的问题。因此基于以上已有协议,新近提出了基于圆覆盖原理的“雨点”式分簇算法<sup>[5]</sup>,实现了节点的自覆盖和能量的均衡损耗。但对于该算法仅进行了文字和公式的描述,包括众多其他的无线传感器网络协议在内,都少有相关形式化的研究和建模,这样就不容易对新建的或已有的协议或算法进行形式化的分析,缺少基于数学模型的定量研究,不便于无线传感器网络分簇的发展。

作为软件形式化技术的一种,Petri 网逐渐发展成为一种适合于描述异步的、并发的、分布式的计算机系统模型的图形化数学工具<sup>[6]</sup>。本文在研究已有的无线传感器网络经典算法的基础上,结合新近提出的基于圆覆盖的“雨点”协议,运用广义随机 Petri 网(Generalized Stochastic Petri Net,GSPN)来对无线传感器网络的“雨点”算法进行建模,避开网络动态描述的复杂性,探讨算法在无线传感器网络在分簇和节点覆盖方面的进一步发展。

收稿日期:2010-01-18;修回日期:2010-03-09。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10661007);兰州交通大学青蓝工程资助项目。

作者简介:胡晓辉(1963-),男,甘肃兰州人,教授,博士,主要研究方向:智能计算、网络体系结构; 姜浩(1985-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络、软件形式化; 曾雪娜(1984-),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向:软件形式化、网络安全。

## 1 基于 Petri 网的形式化建模

### 1.1 广义随机 Petri 网的定义

一个广义随机 Petri 网  $GSPN = (S, T; F, W, M_0, \lambda)$ , 其中:

1)  $(S, T; F)$  是一个 Petri 网, $S$  的元素是位置(Place), $T$  的元素是变迁(Transition), $F$  是元素的弧,其中允许出现禁止弧,但仅存在于从位置到变迁的弧;

2)  $W$  代表弧权函数;

3)  $M_0$  代表模型的初始标识;

4) 变迁集  $T$  划分为两个子集:  $T = T_i \cup T_t, T_i \cap T_t = \emptyset$ , 时间变迁集  $T_i = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  和瞬时变迁集  $T_t = \{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_n\}$ ;

5) 与时间变迁集相关联的平均变迁实施速率集合  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$ ;

6) 在一个标识  $M$  下为多个可实施的瞬时变迁定义一个随机开关,确定它们之间实施概率选择<sup>[6]</sup>。

### 1.2 GSPN 模型

无线传感器网络“雨点”模型运用圆覆盖的原理,其总体 GSPN 如图 1 所示。其中,  $P_0$  为初始节点, 托肯值为 1, 代表一个单位的待处理数据。

### 1.3 GSPN 模型的化简与分析

基于已经建立的“雨点”协议 GSPN 模型进行合理的化简压缩, 提取出其中的分簇过程, 得到一个简化的 GSPN 模型<sup>[6-7]</sup>, 对该模型中的库所、变迁进行重新定义,  $P_1$  为初始节点, 得到图 2 所示简化的 GSPN 模型。

表1 图1中Place的定义

库所名称	含义	库所名称	含义
$P_0$	普通节点	$P_9$	接收入簇申请
$P_1$	等待传数据	$P_{10}$	等待接收数据
$P_2$	等待选择状态	$P_{11}$	等待加入一个簇
$P_3$	半径之外的节点(游离态)	$P_{12}$	未成功加入簇的节点
$P_4$	未被选择为中央	$P_{13}$	簇节点
$P_5$	等待分簇,竞争簇首	$P_{14}$	数据接收完毕
$P_6$	竞争成为簇首	$P_{15}$	准备发送数据给Sink
$P_7$	未竞争成为簇首	$P_{16}$	休眠状态
$P_8$	等待接收入簇申请		

表2 图1中Transition的定义

变迁名称	含义	变迁名称	含义
$T_0$	数据采集	$T_6$	重新变为待选择状态
$T_1$	参数计算	$T_7$	向簇首发送数据
$T_2$	广播簇首信息	$T_8$	接收簇节点数据
$T_3$	发送入簇信息	$T_9$	数据融合
$T_4$	接收簇首信息	$T_{10}$	数据传输到Sink
$T_5$	重新变为待传状态	$T_{11}$	唤醒节点

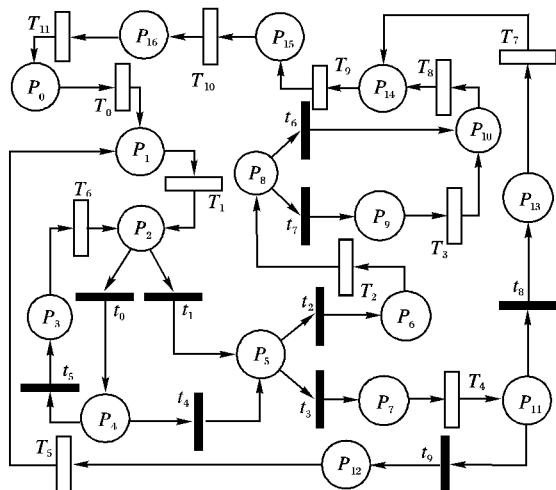


图1 “雨点”协议的GSPN模型

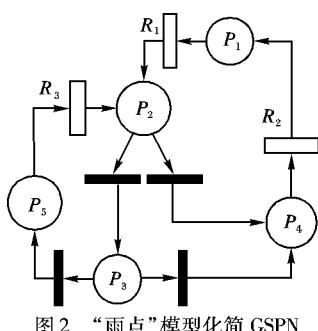
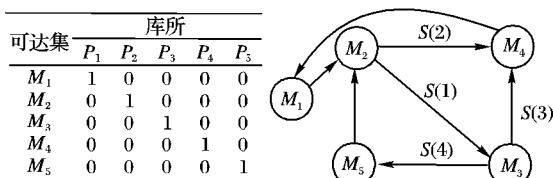


图2 “雨点”模型化简GSPN

通过分析简化的GSPN模型,可以得到其马尔可夫链(Markov Chain, MC),如图3所示。



对于以上简化的GSPN模型,利用随机离散有穷状态马尔可

夫过程理论<sup>[6,8]</sup>对其稳态概率进行求解来分析系统的性能。

GSPN 可达集  $S = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$ , 其可达关系如图3所示。将可达集  $S$  分为两个不相交的子集  $S_1$  和  $S_2$ , 再将  $S_2$  分成两个子集  $S_{2i}$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ) 和  $S_{2T}$ 。其中  $S_1 = \{M_1\}$ ,  $S_2 = \{M_2, M_3, M_4, M_5\}$ ,  $S_2$  的子集为  $S_{21} = \{M_4\}$ ,  $S_{22} = \{M_5\}$ ,  $S_{2T} = \{M_2, M_3\}$ , 其中  $S_{2T}$  为消失集合状态。 $d_i$  是陷阱概率向量, 表示从  $S_{2T}$  中的状态到  $S_{2i}$  状态的转移概率, 设  $d_1 = S(1)$ ,  $d_2 = S(2)$ ,  $d_3 = S(3)$ ,  $d_4 = S(4)$ 。这里,  $|S| = n = 5$ ,  $|S_1| = k = 1$ ,  $l = 2$ 。

由此可得  $4 \times 2$  阶矩阵  $K'$  和  $2 \times 4$  阶矩阵  $K''$  分别为:

$$K' = \begin{pmatrix} M_4 & 1 & 0 \\ M_5 & 0 & 1 \\ M_2 & S(2) & S(1)S(4) \\ M_3 & S(3) & S(4) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$K'' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

再考虑时间变迁, 这里设三个时间变迁的实施速率分别为  $R_1, R_2, R_3$ , 可以得到矩阵  $A'', B'', C''$  和  $D''$  分别为:

$$A'' = (-R_1) \quad (3)$$

$$B'' = (0 \ 0 \ R_1 \ 0) \quad (4)$$

$$C'' = \begin{pmatrix} M_4 & R_2 \\ M_5 & 0 \\ M_2 & 0 \\ M_3 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$D'' = \begin{pmatrix} M_4 & -R_2 & 0 & 0 \\ M_5 & 0 & 0 & R_3 \\ M_2 & 0 & 0 & 0 \\ M_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由  $A' = \begin{pmatrix} A'' & B''K' \\ K''C'' & K''D''K' \end{pmatrix}$  可得:

$$A' = \begin{pmatrix} -R_1 & S(2)R_1 & S(1)S(4)R_1 \\ R_2 & -R_2 & 0 \\ 0 & S(3)R_3 & S(4)R_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

令  $Y = (P(M_1), P(M_4), P(M_5))$ , 有:

$$\begin{cases} YA' = 0 \\ P(M_1) + P(M_4) + P(M_5) = 0 \end{cases}$$

解此方程组, 即可得对应的GSPN实存状态的稳定状态概率为:

$$\begin{cases} P(M_1) = \frac{R_2R_3}{R_2R_3 + R_1R_3 - R_1R_2S(1)} \\ P(M_4) = \frac{R_1R_3}{R_2R_3 + R_1R_3 - R_1R_2S(1)} \\ P(M_5) = \frac{R_1R_2(1 - S(2))/S(3)}{R_2R_3 + R_1R_3 - R_1R_2S(1)} \end{cases}$$

除此之外, 还可以通过将GSPN同构于嵌入式马尔可夫链(Embedded Markov Chain, EMC), 从中移去消失状态, 仅在压缩的EMC上计算实存状态之间的转移概率来进行求解。

## 2 GSPN模型仿真

运行GSPN仿真软件SPNP, 将图1中所表示的GSPN模型在软件中建模, 以  $P_0$  为初始节点定义库所托肯并运行软件, 计算数据融合传输后库所的托肯值, 通过改变变迁集  $T_i$  所表示的分支事件的发生概率, 得到图4的仿真结果。

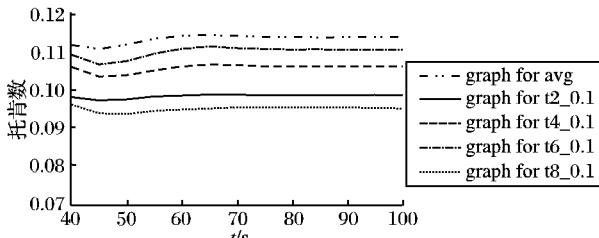


图4 GSPN模型的多事件性能对比

图4中按照图例所示从上到下依次代表:①所有分支事件均以相同概率发生的基准情况;②待簇节点竞争成为簇首节点为低概率的情况;③在覆盖范围内且成为待簇节点为低概率的情况;④簇头节点无簇成员加入为低概率的情况;⑤成员节点成功入簇为低概率的情况。对整个GSPN模型来说,这些分支事件的发生,会影响整个分簇过程的性能。对比图4中的仿真曲线,可以得到对于分簇性能的影响依次为:①<④<③<②<⑤。当非中心节点进行圆覆盖操作来进行分簇算法时,是否在圆覆盖半径内,对整个网络的信息传输效率影响非常大,明显大于其后在已经形成的簇内进行操作所造成的影响。因此可以得出,入簇是否成功,是整个算法的关键。

节点成功入簇就涉及到节点平衡度控制的问题。当一个簇内节点过多时,会增加簇首融合的能量消耗,减少簇首寿命,但同时也会减少该节点再次竞争成为簇首的几率,从而有可能延长整个簇的生存时间<sup>[4]</sup>。因此,用一个参数对在圆覆盖半径内的节点进行控制是必要的。对于拥有不同的数据结构的节点,其融合耗能与传输耗能之比也不一样,所以,要对原算法固定簇的平衡度的设置进行改变;对于不同的无线传感器网络要设置相应的参数来保证实际应用中性能与能耗的平衡。

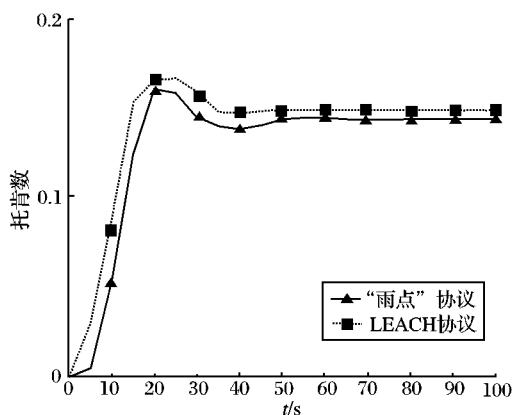


图5 “雨点”协议与LEACH协议的比较

假设一个区域有100个节点,共分为10个簇,即每个簇有1个簇头节点和9个簇成员节点的情况下与LEACH协议<sup>[9]</sup>进行对比,得到如图5所示的结果。曲线稳定后可以看

出,在应用圆覆盖的概念解决了节点覆盖问题的基础上,新的算法虽然数据传输量相比LEACH协议有所下降,但同时节点能耗也有所降低,在时间上也有所推后,较为有效地改进了无线传感器网络的分簇性能。

### 3 结语

通过对无线传感器网络运用Petri网这种形式化的工具进行建模,可以有效地分析出将圆覆盖的概念结合于已有LEACH协议的分簇过程所具有的性能,在实现较好的无线传感器网络能耗控制和节点覆盖的同时,对其参数设置进行重定义,改变原算法中单一的节点平衡度控制,改进了原有的协议,使其可以适合更多的不同的节点数据结构。此外,针对各种不同特性的传感器节点,发展更为精确仿真模型和更优的方法,是今后进一步研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] 王殊. 无线传感器网络的理论及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [2] XU Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Geography informed energy conservation for Ad Hoc routing[C]// Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2001: 70–84.
- [3] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660–670.
- [4] DEB B, BHAVNAGAR S, NATH B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management[EB/OL]. [2009-09-10]. <http://www.research.rutgers.edu/~bdeb/ieeeCNS.pdf>.
- [5] 胡晓辉, 李欣, 吕登峰. “雨点”式无线传感器网络分簇算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(3): 116–118.
- [6] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [7] LI Y, WOODSIDE C M. Complete decomposition of stochastic Petri nets representing generalized service networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 1995, 44(4): 577–592.
- [8] AMMAR H H, LIU R W. Analysis of the generalized stochastic Petri nets by state aggregation[C]// International Workshop on Timed Petri Nets. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1985: 88–95.
- [9] 彭艾. 无线传感器网络LEACH协议的Petri网模型及性能分析[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 1059–1063.
- [10] KOROMA J, LI WEI, KAZAKOS D. A generalized model for network survivability[C]// Proceedings of the 2003 Conference on Diversity in Computing. New York: ACM, 2003: 47–51.
- [11] CHIASSERINI C F, GARETTO M. Modeling the performance of wireless sensor networks[EB/OL]. [2009-09-20]. [http://www.ieee-infocom.org/2004/Papers/06\\_1.PDF](http://www.ieee-infocom.org/2004/Papers/06_1.PDF).
- [12] YE F, ZHONG G, LU S, et al. Energy efficient robust sensing coverage in large sensor networks[R]. University of California, Los Angeles, 2002.
- [13] TIAN D, GEORGANAS N D. Location and calculation-free node-scheduling schemes in large wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 65–85.
- [14] AMMARI H M, DAS S K. Critical density for coverage and connectivity in three-dimensional wireless sensor networks using continuum percolation[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(6): 872–885.
- [15] 李彩丽, 冯海林, 侯楠. 能量有效的无线传感器网络覆盖算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

(上接第1721页)

- [10] YE F, ZHONG G, LU S, et al. Energy efficient robust sensing coverage in large sensor networks[R]. University of California, Los Angeles, 2002.
- [11] YE F, ZHONG G, CHENG J, et al. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks[C]// 23th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. New York: IEEE, 2003: 28–37.
- [12] 毛莺池, 王志坚, 陈力军, 等. 节点位置无关的无线传感器网络连通性部分覆盖协议[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(10): 8.

- [13] TIAN D, GEORGANAS N D. Location and calculation-free node-scheduling schemes in large wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 65–85.
- [14] AMMARI H M, DAS S K. Critical density for coverage and connectivity in three-dimensional wireless sensor networks using continuum percolation[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(6): 872–885.
- [15] 李彩丽, 冯海林, 侯楠. 能量有效的无线传感器网络覆盖算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.